

Modelagem e Análise da Máquina de Relutância Chaveada com Rotor Externo para Sistema Armazenador de Energia Cinética (*Flywheel*) de Alta Velocidade: Modo Motor/Gerador com Controle em Cascata

Janito dos Santos Ramos * Luís Guilherme Barbosa Rolim **

* *Laboratório de Eletrônica de Potência, Programa de Engenharia Elétrica (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro, RJ (e-mail: janitodossantos23@gmail.com).*

** *Laboratório de Eletrônica de Potência, Programa de Engenharia Elétrica (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro, RJ (e-mail: rolim@poli.ufrj.br).*

Abstract: A switched reluctance machine (SRM) has been extensively studied due to its characteristics, with the purpose of being used in several applications. Among the possible applications, this article uses an external rotor switched reluctance machine, operating at high speed, in a Kinetic Energy Storage System (flywheel). Flywheels can be used in various applications as an auxiliary source, in hybrid vehicles or even in an emergency power system. The external rotor serves as flywheel. This article presents the mathematical and computational model of the SRM, using non-linear curves of current and torque, obtained by finite element method analysis. It is also used a control in cascade, with speed and current of the machine, functioning as a motor and generator, connected to the grid through the back-to-back converter configuration. The simulations were performed in software Matlab / Simulink. The results are presented in order to demonstrate the functioning of the developed system and its applicability.

Resumo: A máquina de relutância chaveada (SRM) tem sido muito estudada, devido às suas características, com o objetivo de ser empregada em diversas aplicações. Dentre as possíveis aplicações, este artigo aborda o emprego de uma máquina de relutância com rotor externo, operando em alta velocidade, em um Sistema Armazenador de Energia Cinética (*flywheel*). Um *flywheel* pode ser utilizado em diversas aplicações como fonte auxiliar, em veículos híbridos, ou ainda em um sistema de alimentação de emergência. O rotor externo serve como volante de inércia. O presente artigo apresenta o modelo matemático e computacional da SRM, utilizando as curvas não lineares de corrente e torque obtidas via análise pelo método dos elementos finitos. É também apresentado o controle em cascata envolvendo as variáveis velocidade e corrente da máquina, funcionando como motor e gerador, conectada à rede trifásica através de conversores em configuração *back-to-back*. As simulações foram realizadas no *software Matlab/Simulink*. Os resultados obtidos demonstram o funcionamento do sistema desenvolvido e a sua aplicabilidade.

Keywords: Kinetic energy storage; Flywheel; Reluctance machine; External rotor; High speed.

Palavras-chaves: Armazenador de energia cinética; Volante de Inércia; Máquina de relutância; Rotor externo; Alta velocidade.

1. INTRODUÇÃO

A máquina de relutância chaveada (SRM, do inglês, *Switched Reluctance Machine*) é antigo membro da família das máquinas, cujos registros da sua primeira aplicação remontam a 1838, sob princípio de funcionamento baseado em relutância variável (Miller et al. (1993)).

A SRM teve que esperar o desenvolvimento de sistemas de acionamento capazes de satisfazer os seus requisitos de funcionamento, que exige troca de corrente rápida entre as fases e o conhecimento da posição instantânea dos eixos. O advento da eletrônica de potência e o rápido

desenvolvimento de sistemas microprocessados de alto desempenho e baixo custo, contribuíram sistematicamente para que a SRM se tornasse uma forte candidata para ser utilizada (Chowdhury et al. (2017)).

Nos últimos anos, novos desenvolvimentos da SRM foram relatados. Pesquisadores têm investido mais atenção a SRM devido às suas características, testemunhando um interesse significativo na modelagem, no controle e na simulação desta máquina. A ênfase das pesquisas tem sido em topologias de conversor e classificações, análise completa do comportamento no estado estacionário e projeto da máquina (Ho et al. (2019); Li et al. (2019)).

Os interesses na SRM devem-se às suas características como estrutura simples, robustez, operação tolerante as falhas, peso adequado em relação à potência, alto torque de partida, capacidade de operar com perda de uma fase para máquinas polifásicas (fases independentes fisicamente, magneticamente e eletricamente uma das outras), baixo custo de construção e facilidade de projeto. Essas vantagens tornam a SRM atraente para diversas aplicações (Sengor et al. (2013); Chen and Gu (2013)).

A SRM tem algumas limitações como: deve sempre ser eletronicamente comutada e assim não pode ser diretamente conectada ao barramento CC ou a uma linha CA. A sua estrutura saliente e fortemente magnética causa características não lineares, complicando a sua análise e controle. Também a SRM apresenta ondulação de torque e efeitos ruidosos (Memon et al. (2018); Zabihi and Gouws (2016)).

A SRM deste artigo é baseado no trabalho desenvolvido por Bernsmuller (2016), utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF). A sua estrutura básica é ilustrada na Figura 1, que é uma vista em corte transversal.

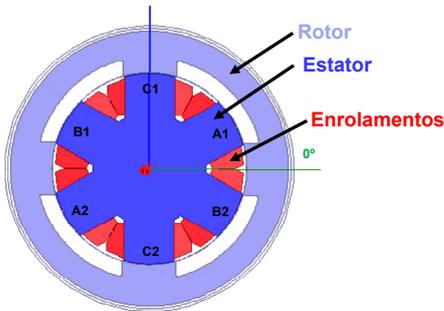


Figura 1. Seção transversal da SRM 6/4.

A SRM da Figura 1 tem polos salientes no rotor e estator, tornando-se uma máquina duplamente saliente. Possui 4 polos do rotor e 6 do estator, sendo referida como uma SRM 6/4. Cada polo do estator tem uma bobina enrolada de forma concentrada em torno de si. Duas bobinas nos polos do estator opostos podem ser conectadas em série ou em paralelo, perfazendo uma fase da máquina. Os parâmetros da SRM desenvolvida são apresentados na Tabela A.1 do Apêndice A.

A SRM está rapidamente ganhando importância em aplicações de velocidade variável como bombas, ventiladores, eletrodomésticos, atuadores aeroespaciais e automotivos (Chen and Gu (2013)).

Também pode ser empregado em um Sistema Armazenador de Energia Cinética (SAEC) - *Flywheel*, e como gerador de energia eólica (Barros et al. (2013)).

Para o presente trabalho é utilizada uma SRM com rotor externo, operando em alta velocidade em um SAEC.

Comercialmente existem aplicações de SAEC em conjunto com geradores a diesel ou a gás, que formam um sistema de alimentação de emergência, funcionando como Fonte de Alimentação Ininterrupta (UPS, em inglês) (Zanei et al. (2007)). Os SAEC comerciais normalmente empregam volantes de inércia volumosos e pesados. O SAEC enquanto se descarrega opera como um gerador convertendo a ener-

gia cinética do volante de inércia em energia elétrica, mantendo a alimentação de uma carga crítica. Por haver a desaceleração do volante de inércia, este modo de operação é chamado *flywheel* (Bitterly (1997)).

A maioria das aplicações da SRM como SAEC apresenta a característica de possuir rotor interno, porém para simplificar o projeto mecânico, o rotor é externo e desempenha de forma integrada a função de volante de inércia, operando em alta velocidade. A justificativa da proposta baseia-se na equação (1). A energia cinética (E_C) é diretamente proporcional ao momento de inércia (J) do rotor, e ao quadrado da velocidade angular (W). Com o rotor externo o momento de inércia pode ser maior, aumentando a energia armazenada.

$$E_C = \frac{1}{2} J W^2 \quad (1)$$

A estrutura do artigo inicia-se com as análises dos requisitos para o controle da SRM, operando em alta velocidade. Assim, primeiramente, são apresentados o modelo matemático da SRM, o projeto e a implementação em diagramas de blocos no *software Matlab/Simulink*. Posteriormente, apresentam-se o acionamento e controle da SRM conectada à rede trifásica, durante a operação motora e geradora. Para manter a tensão do barramento CC é realizado o controle do conversor fonte de tensão (VSC, *Voltage Source Converter*), e por fim são apresentados os resultados.

2. MODELAGEM DA SRM

O princípio da operação da SRM é análogo ao funcionamento de um solenoide com núcleo ferromagnético.

O esforço mecânico correspondente ao torque eletromagnético (T_e) para o movimento angular associado a posição (θ) é dado por:

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}, \quad (2)$$

onde, $L = f(\theta, i)$ é a indutância em função da posição angular (θ) e da corrente (i) (Stephan (2013)).

A Figura 2 apresenta as curvas idealizadas de indutância e torque da SRM.

A partir da figura, as regiões “R1” e “R3” caracterizam-se por possuírem indutâncias constantes. Na região “R1”, o valor da indutância de fase é mínimo (L_{min}), pois corresponde à condição de máximo desalinhamento do rotor (ângulo elétrico $\theta = \pm 90^\circ$). O valor máximo da indutância (L_{max}) ocorre quando os polos do rotor estão alinhados ($\theta = 0^\circ$ e $\theta = 180^\circ$), correspondendo à região “R3”.

A região “R2” representa o intervalo em que o rotor desloca-se em direção ao estator apresentando, portanto, valores crescentes de indutância. Já a região “R4” registra o afastamento do polo do rotor pelo polo do estator levando a um decaimento do valor da indutância.

As regiões “R2” e “R4” apresentam valores de indutâncias que variam linearmente com a posição (θ). Essa caracterís-

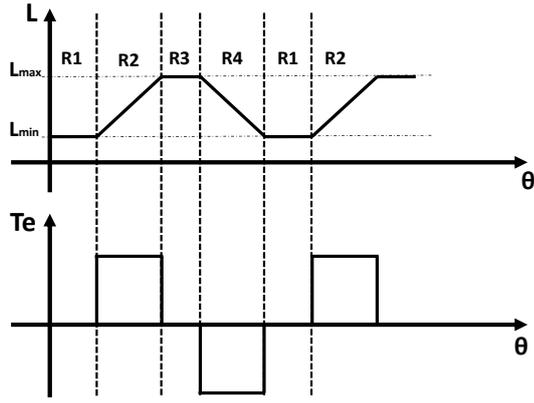


Figura 2. Indutância do enrolamento e torque eletromagnético em relação à posição angular.

tica construtiva é interessante, pois permite que o torque da equação (2) seja reduzido a uma constante.

Para que o rotor possa girar continuamente é necessário que o torque seja mantido sempre no mesmo sentido, sem valores nulos. Para isso, as regiões “R1” e “R3” se tornam inadequadas para a permanência do rotor, já que não apresentam torque. Por outro lado, as regiões “R2” e “R4” garantem o movimento do rotor ($T_e \neq 0$) nas operações como motor e gerador, respectivamente.

A tensão instantânea nos terminais do enrolamento da SRM está relacionada com o fluxo pela lei de Faraday como:

$$V_s = r_s \cdot i + \frac{d\Psi(\theta, i)}{dt}, \quad (3)$$

onde, V_s é a tensão do enrolamento de fase, r_s é a resistência genérica dos enrolamentos, i é a corrente do enrolamento de fase e Ψ é o fluxo enlaçado.

Devido a característica de dupla saliência da SRM e os efeitos de saturação magnética, o fluxo enlaçado varia em função da posição do rotor (θ) e da corrente de fase (i) (Le-Huy and Brunelle (2005)).

Para o cálculo de estimação do fluxo enlaçado pode-se utilizar a expressão:

$$\Psi = \int (V_s - r_s \cdot i) dt \quad (4)$$

As correntes do estator são dadas pela função não linear $i(\Psi, \theta)$, que pode ser calculada a partir da curva de magnetização $\Psi(i, \theta)$.

A partir do equacionamento matemático, o modelo não linear em diagrama de blocos da SRM é mostrado na Figura 3.

Na figura 3, T_L é o torque de carga, W é a Velocidade, W_0 é a velocidade inicial, θ_0 é a posição inicial, B é o escoamento viscoso e J é o momento de inércia.

A curva $i(\Psi, \theta)$ obtida a partir da $\Psi(i, \theta)$ é uma função altamente não linear devido ao fato de que a SRM opera principalmente na região saturada. Esta pode ser obtida por via de três maneiras: ensaio experimental, computação

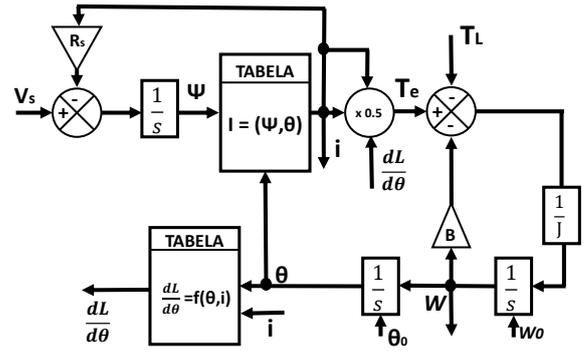


Figura 3. Modelagem da SRM.

por Método de Elementos Finitos (MEF) e aproximação analítica (Le-Huy and Brunelle (2005)).

Para este trabalho, a curva $\Psi(i, \theta)$ foi obtida por meio de MEF, e é apresenta na Figura 4.

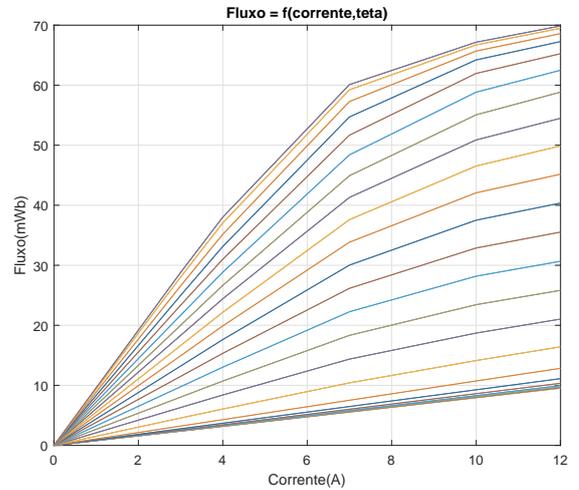


Figura 4. Curva $\Psi(i, \theta)$.

Da curva da Figura 4, é obtida a curva $i(\Psi, \theta)$, mostrada na Figura 5.

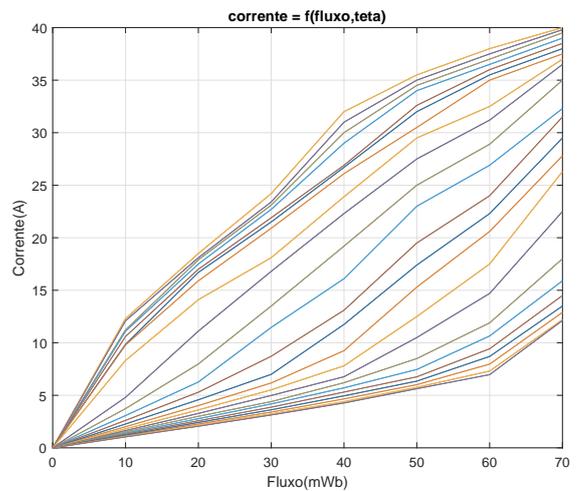


Figura 5. Curva $i(\Psi, \theta)$.

A curva $L = f(i, \theta)$ é mostrada na Figura 6. É possível verificar que a indutância decai para ângulo ente 0° e 30° ,

funcionando como gerador. Já para ângulo entre 60° e 90° , a SRM funciona como motor.

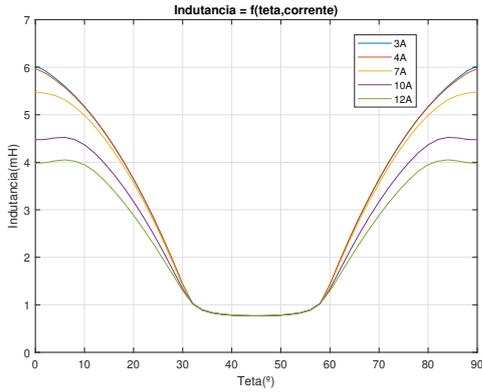


Figura 6. Curva $L = f(i, \theta)$.

O torque eletromagnético pode ser obtido pela indutância ou pela soma dos torques individuais desenvolvidos em cada fase. Devido a não linearidade da curva $i(\Psi, \theta)$, o torque desenvolvido ($T_e(\theta, i)$) é uma função não linear da corrente do estator e da posição do rotor, e a sua curva de uma das fases é apresentada na Figura 7.

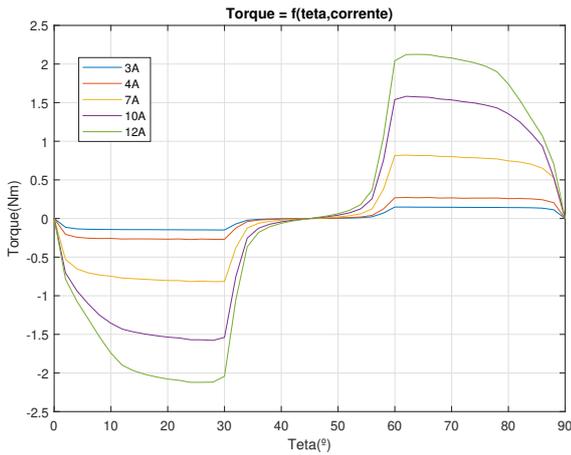


Figura 7. Curva $T_e(\theta, i)$.

O modelo implementado no *Matlab/Simulink* é apresentado na Figura 8, para cada uma das fase da máquina. As curvas $i(\Psi, \theta)$ e $T_e(\theta, i)$ foram alimentadas a partir de tabelas de consultas (*lookup table*).

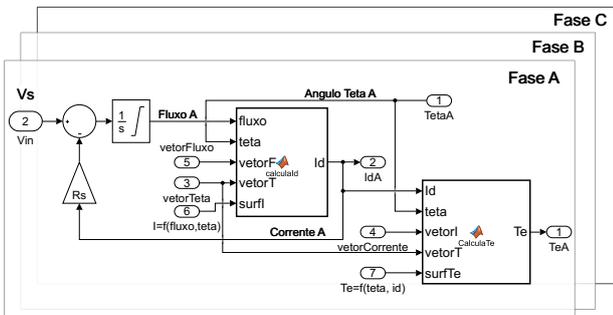


Figura 8. Modelo em diagrama de blocos da SRM implementado no *Matlab/Simulink*.

3. CONTROLE DA SRM

Para o presente trabalho é utilizado o esquema de conexão da máquina com a rede trifásica apresentado na Figura 9.

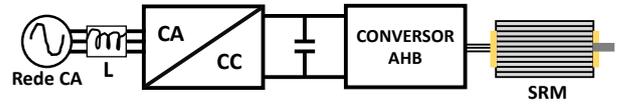


Figura 9. Conexão entre a SRM e a rede.

O conversor eletrônico para a SRM é o ponte assimétrico (AHB, *Assimetric Half Bridge*), Figura 10, que é uma topologia clássica e bem difundida no acionamento da SRM. Existem vários conversores para acionar a SRM, mas o AHB é o mais utilizado, pois permite robustez, os estágios de regeneração de energia e roda livre quando necessário (Barros et al. (2013)).

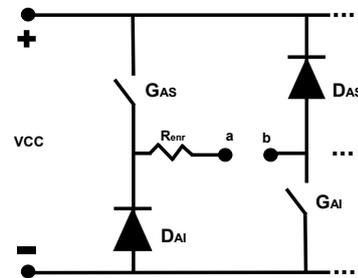


Figura 10. Conversor AHB.

A Figura 10 apresenta a topologia para fase "A" da SRM. O conversor deve ser capaz de aplicar tensão em fases individuais da máquina, e criar o caminho para que a energia possa fluir.

Para a aplicação como *Flywheel*, é necessário um esquema de conversores que permite o fluxo de potência transitar bidirecionalmente entre a máquina e a rede. Uma topologia de conversor que é capaz de executar os chaveamentos desejados é o esquema *back-to-back* (Figura 11).

No esquema pode-se observar a conexão entre os conversores da SRM e da rede através do barramento ou elo CC.

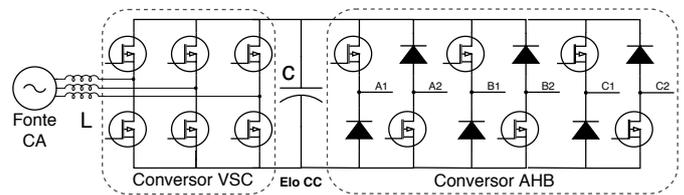


Figura 11. Conexão entre os conversores da SRM e da rede na configuração *back-to-back*.

3.1 Controle do conversor VSC

A tensão do elo CC deve ser mantida constante. Assim, é necessário o controle desta tensão para o balanceamento do fluxo de energia entre a SRM e a rede.

A estratégia de controle aplicada ao conversor VSC consiste em dois *loops* (Yazdani and Iravani (2010)). Existe

um *loop* interno que controla a corrente enviada pela rede, e externamente existe um *loop* de controle de tensão do barramento (V_{dc}).

O controle da tensão do elo CC é realizado no sistema de coordenada dq , usando a transformada de Park ($abc-dq$) com ângulo de tensão da rede (obtida pelo *Phase-Locked Loop* (PLL)).

O controle da tensão (V_{dc}) é realizado com o regulador PI (Proporcional, Integral), que gera o valor I_{d*} , enquanto o valor de I_{q*} é colocado na referência zero, como mostra a Figura 12. O controle de corrente, também, passa pelo regulador PI, do qual é gerada a tensão trifásica de referência.

Para a geração dos pulsos é utilizada a Modulação por Largura de Pulso (PWM, *Pulse Width Modulation*) triangular.

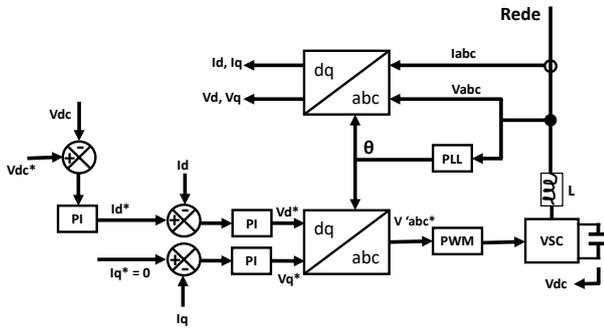


Figura 12. Controle do conversor VSC na coordenada dq .

3.2 Controle do conversor AHB

A Figura 13 apresenta o diagrama de blocos da SRM com controle em cascata implementado. Na malha interna é realizado o controle da corrente, e externamente é implementado o controle da velocidade.

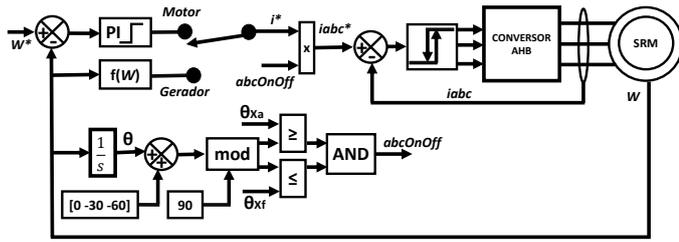


Figura 13. Diagrama de blocos do controle AHB.

O controle da SRM é realizado baseado na posição angular. A partir da realimentação da velocidade, aplicando a integral, é encontrada as posições angulares. São definidas as posições iniciais como 0° , -30° e -60° , para as fases “A”, “B” e “C”, respectivamente.

Em razão do comportamento da indutância, torna-se necessário ajustar as posições angulares que governam o fechamento (θ_{Xf}) e a abertura (θ_{Xa}) das chaves dos braços do conversor de potência que aciona a SRM.

A Figura 14 ilustra estes ajustes de θ_{Af} e θ_{Aa} em relação à fase “A” na operação motora.

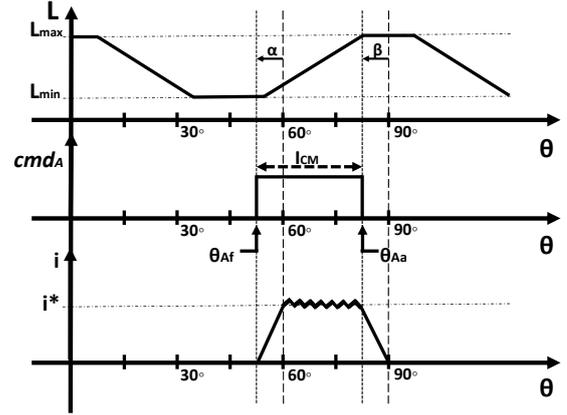


Figura 14. Comando de abertura e fechamento das chaves na operação motora.

Como o período angular para a fase “A” compreende o intervalo $I_{fA}=[0^\circ; 90^\circ]$, o valor da posição angular referenciada para a fase “A” é o resto da divisão (*mod*) entre a posição (θ) e 90° :

$$\theta_{fA} = \text{mod}(\theta, 90). \quad (5)$$

De modo similar, as posições angulares para as fases “B” e “C” são, respectivamente:

$$\theta_{fB} = \text{mod}(\theta - 30, 90). \quad (6)$$

$$\theta_{fC} = \text{mod}(\theta - 60, 90). \quad (7)$$

Os sinais que geram o intervalo de condução, I_{CM} , associados a fase genérica “X”, durante a operação motora, podem ser obtidos por:

$$cmd_X = \begin{cases} 1, & \text{se } 60^\circ - \alpha \leq \theta_{fX} < 90^\circ - \beta \\ 0, & \text{Caso contrário.} \end{cases} \quad (8)$$

Os valores de α e de β para a operação motora são ambos 10° . Esse ângulo de avanço evita o surgimento de uma parcela de torque negativo para velocidades elevadas.

As saídas do cmd_X são multiplicadas pela corrente (i^*), obtendo a referência de cada fase ($iabc^*$). Durante a operação motora, a corrente de referência (i^*) é obtida via controle da velocidade com o controlador PI. Através da realimentação da corrente são obtidos os erros de cada fase. O sinal do erro passa pela banda de histerese de ± 1 A, do qual são obtidos os sinais de chaveamento para os conversores.

O chaveamento utilizado é bipolar, isto é, as duas chaves de cada fase são ligadas e desligadas simultaneamente.

A estratégia de controle da SRM operando como gerador é similar à operação motora. No caso do gerador, trabalha-se na região de decaimento da indutância.

Os ajustes das posições angulares que governam o fechamento (θ_{Xf}) e a abertura (θ_{Xa}) das chaves dos braços do conversor de potência para a fase “A” são mostrados na Figura 15.

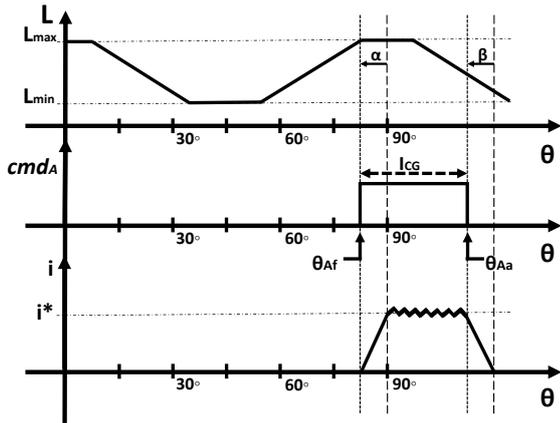


Figura 15. Comando de abertura e fechamento das chaves na operação geradora.

Os sinais que geram o intervalo de condução, I_{CG} , associados a fase genérica “X”, podem ser obtidos por:

$$cmd_X = \begin{cases} 1, & \text{se } 0^\circ - \alpha \leq \theta_{fX} \leq 30^\circ - \beta \\ 0, & \text{Caso contrário.} \end{cases} \quad (9)$$

O ângulo α escolhido é 0° e β é 10° .

A principal diferença entre gerador e motor é em relação à corrente de referência (i^*). Na operação geradora, essa corrente é uma função que depende da velocidade.

Durante a operação do SAEC, em modo flywheel, ocorre grande variação de velocidade angular. O rotor desacelera a partir de 50 kRPM até velocidades menores que 20 kRPM. A corrente deve ser alterada em função da velocidade angular para que a potência fornecida ao barramento possa suprir a demanda da carga para uma ampla variação de velocidade. A Equação 10 apresenta a fórmula usada no cálculo de corrente, dada em ampères, onde W é dada em RPM.

$$i^* = 4 + \frac{4}{30000} \cdot (50000 - W) \quad (10)$$

4. RESULTADOS

Os resultados são expostos a seguir e logo após são discutidos alguns pontos importantes.

A Figura 16 apresenta o diagrama de blocos da simulação realizada no *Matlab/Simulink*.

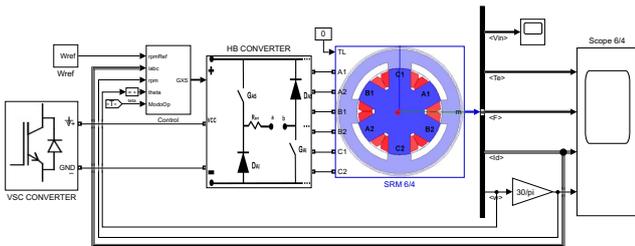


Figura 16. Diagrama de bloco da simulação realizada.

A simulação realizada é discretizada, utilizando segurador de ordem zero (*Zero-Order Hold - ZOH*) com frequência de

100 kHz. Assim, o chaveamento do conversor AHB é nessa mesma frequência. A frequência do PWM do conversor VSC é 10 kHz.

A Figura 17 mostra as curvas do torque, da corrente, do fluxo e da velocidade obtidas da simulação. A referência da velocidade é inicialmente de 4 kRPM, depois é alterado para 8 kRPM, e por fim, para 50 kRPM que é a velocidade nominal durante a operação motora. Na operação geradora, a velocidade da SRM diminui até 20 kRPM, quando novamente volta para a operação motora.

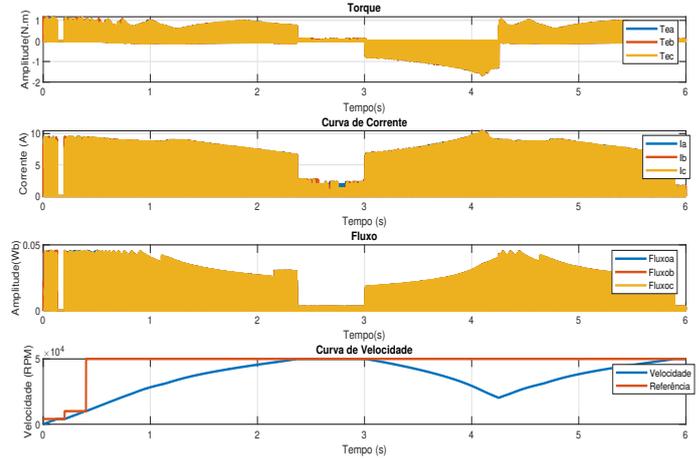


Figura 17. Curvas do torque, da corrente, do fluxo e da velocidade da SRM.

Para referência de velocidade de 4 kRPM, as curvas de resposta são apresentadas na Figura 18.

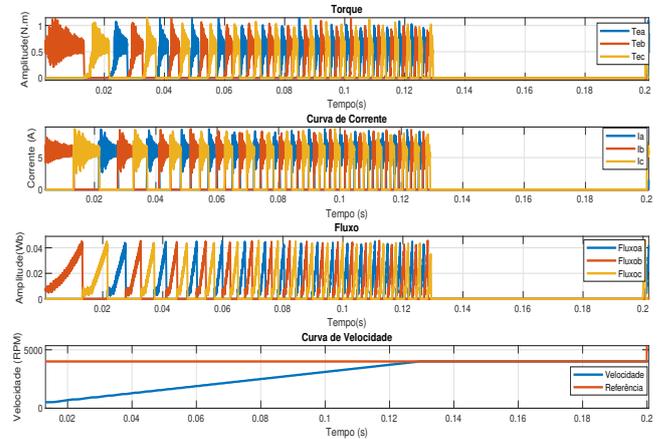


Figura 18. Curvas do torque, da corrente, do fluxo e da velocidade na operação motora para referência de 4 kRPM.

Quando a SRM atingir a velocidade de 50 kRPM, as curvas da resposta são mostradas na Figura 19.

Quando a SRM inicia o modo gerador, as curvas de respostas podem ser vistas na Figura 20.

Quando a SRM atingir a velocidade de 20 kRPM, a operação muda para motora. As curvas de resposta são apresentadas na Figura 21.

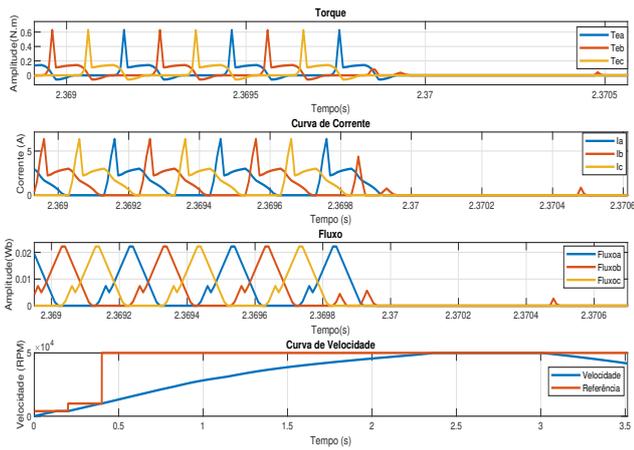


Figura 19. Curvas do torque, da corrente, do fluxo e da velocidade na operação motora para referência de 50 kRPM.

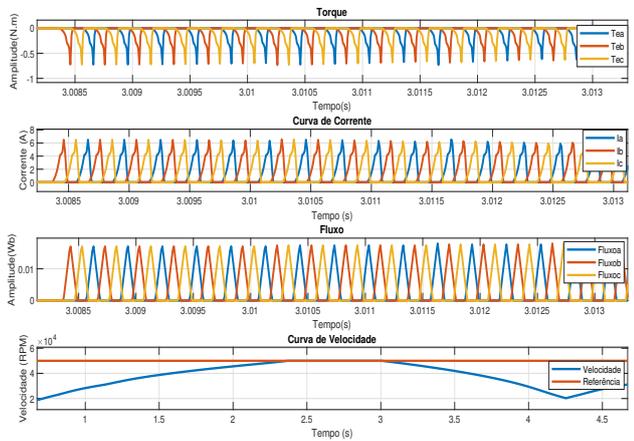


Figura 20. Curvas do torque, da corrente, do fluxo e da velocidade no início da operação geradora.

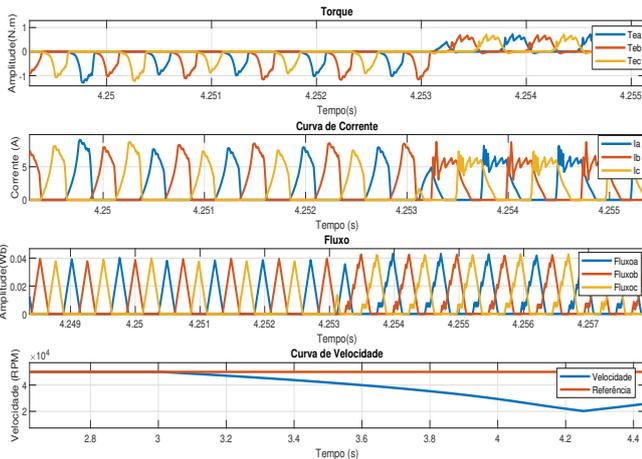


Figura 21. Curvas do torque, da corrente, do fluxo e da velocidade na mudança de modo gerador para motor.

A partir dos resultados apresentados, observa-se que as curvas estão de acordo com o esperado. A velocidade da SRM acompanha a referência desejada. As curvas do torque, da corrente e do fluxo estão de acordo, rastreamento os valores como os apresentados na simulação por MEF.

Observa-se também que o ângulo de avanço evitou o surgimento de torque negativo durante a operação motora. Já na operação geradora, o avanço do ângulo evitou o surgimento de corrente altas.

A Figura 22 apresenta as curvas da tensão e de corrente do barramento CC, a Figura 23, as curvas da tensão e da corrente do lado CA, e a Figura 24, a curva de potência.

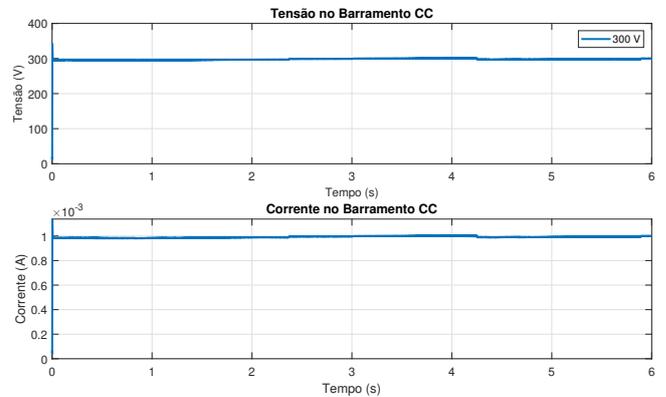


Figura 22. Curvas da tensão e corrente do elo CC.

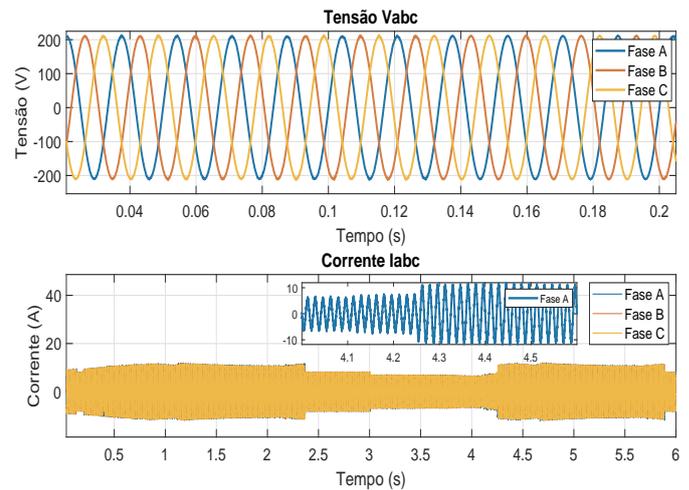


Figura 23. Curvas da tensão e da corrente do lado CA.

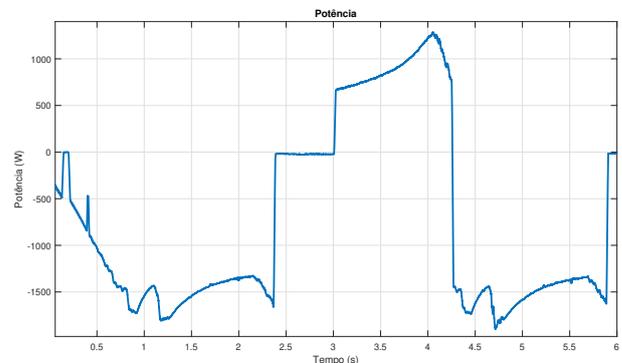


Figura 24. Curva da potência.

O resultado apresentado na curva da Figura 22 mostra que a tensão do barramento CC possui um valor constante, apesar dos distúrbios. Assim, o controle do conversor VSC foi robusto, rejeitando as perturbações externas existentes.

As curvas da corrente e da tensão do lado CA são satisfatórias. A corrente varia de acordo com a operação, diminuindo quando a máquina fornece potência à rede.

A potência ativa no barramento CA aumentou, consequentemente de fornecimento de potência ativa por parte do gerador. A potência gerada é suficiente para suprir uma carga crítica de aproximadamente 1 kW por determinado tempo.

5. CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou a modelagem e controle da SRM conectada à rede trifásica, aplicada ao SAEC. A partir da modelagem foi realizado o controle da velocidade da máquina para o seu funcionamento como motor e gerador. Os resultados apresentados de controle de SAEC foram satisfatórios para fins de validação do modelo computacional, mostrando também ser possível gerar a potência requerida de 1kW, mesmo próximo ao limite inferior de velocidade de 20 kRPM.

Os métodos de controle implementados apresentaram respostas rápidas. O controle dos conversores VSC e AHB foram robustos.

Foi possível confirmar o funcionamento da máquina para aplicações que requerem velocidade alta e variável, no caso em específico para SAEC, pois o controle proposto foi capaz de fazer variar a velocidade em toda a faixa especificada, possibilitando armazenar a energia absorvida durante a aceleração e devolvendo-a posteriormente durante a redução da velocidade. Contudo o controle precisa ainda ser aprimorado para manter regulada a potência gerada durante todo o intervalo de redução da velocidade, desde a máxima até a mínima. O projeto com rotor externo mostra-se ser uma ótima solução para reduzir volume e custo do *flywheel*.

Para trabalho futuro, pretende-se realizar a implementação prática do sistema simulado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os apoios do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores também são gratos pelo apoio institucional da rede MEIHAPER-CYTED.

REFERÊNCIAS

- Barros, T., Filho, A., and Filho, E. (2013). *Chapter 3 - Direct Power Control for Switched Reluctance Generator in Wind Energy*. Intech.
- Bernsmuller, E. (2016). *Maquina de Relutancia com Rotor Externo para Sistema Armazenador de Energia Cinetica*. Dissertação de mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Bitterly, J.G. (1997). Flywheel technology past, present, and 21st century projections. In *IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Cat. No.97CH6203)*, volume 4, 2312–2315 vol.4. doi:10.1109/IECEC.1997.658228.

- Chen, H. and Gu, J.J. (2013). Switched reluctance motor drive with external rotor for fan in air conditioner. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(5), 1448–1458. doi:10.1109/TMECH.2012.2203359.
- Chowdhury, J., Kumar, G., Kalita, K., Tammi, K., and Kakoty, S.K. (2017). A review on linear switched reluctance motor. *Rakenteiden Mekaniikka*, 50(3), 261–270. doi:10.23998/rm.65121.
- Ho, C., Wang, J., Hu, K., and Liaw, C. (2019). Development and operation control of a switched-reluctance motor driven flywheel. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(1), 526–537. doi:10.1109/TPEL.2018.2814790.
- Le-Huy, H. and Brunelle, P. (2005). A versatile nonlinear switched reluctance motor model in simulink using realistic and analytical magnetization characteristics. In *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005.*, 6 pp.–. doi:10.1109/IECON.2005.1569136.
- Li, S., Zhang, S., Habetler, T.G., and Harley, R.G. (2019). Modeling, design optimization, and applications of switched reluctance machines—a review. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), 2660–2681. doi:10.1109/TIA.2019.2897965.
- Memon, A.A., Shah, S.A.A., Shah, W., Baloch, M.H., Kalo, G.S., and Mirjat, N.N. (2018). A flexible mathematical model for dissimilar operating modes of a switched reluctance machine. *IEEE Access*, 9643–9649.
- Miller, T., Miller, T., and Miller, T. (1993). *Switched Reluctance Motors and Their Control*. Magna Physics.
- Sengor, I., Polat, A., and Ergene, L.T. (2013). Design and analysis of switched reluctance motors. In *2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 586–590. doi:10.1109/ELECO.2013.6713902.
- Stephan, R.M. (2013). Acionamento, comando e controle de máquinas elétricas. *Editora Ciência Moderna Ltda*.
- Yazdani, A. and Iravani, R. (2010). *Voltage-Sourced Converters in Power Systems*. John Wiley & Sons, Inc.
- Zabihi, N. and Gouws, R. (2016). A review on switched reluctance machines for electric vehicles. In *2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 799–804. doi:10.1109/ISIE.2016.7744992.
- Zanei, G., Cevenini, E., Ruff, H., and Ulibas, O. (2007). Integrated systems for ups: New solutions in the power quality chain. In *INTELEC 07 - 29th International Telecommunications Energy Conference*, 582–586. doi:10.1109/INTLEC.2007.4448847.

Apêndice A. PARÂMETROS DA SRM

Tabela A.1. Parâmetros da SRM 6/4.

Parâmetros	Valores
Resistência (r_s)	0,14 Ω
Potência Nominal (P_n)	1 kW
Velocidade (W)	50 kRPM
Momento de inércia (J)	3,05.10 ⁻³ kg.m ²
Tensão no barramento CC (V_{dc})	300 V
Capacitância CC (C)	500 μF
Diâmetro externo	108 mm
Comprimento	50 mm
Comprimento do entreferro	0,3 mm